



УДК 621.923.02: 621.922.025
ГРНТИ 55.22.00: 55.31.35

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА НА ПРОЦЕСС МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ

*С.Ю. ЖАЧКИН, доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)
Н.А. ПЕНЬКОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
О.К. БИТЮЦКИХ, кандидат педагогических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)
А.А. КРАСНОВ
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)*

В статье представлены исследования влияния геометрических характеристик рабочей поверхности шлифовального круга на силы резания, которые возникают при восстановительных операциях шлифования, с целью избежать появления брака при технологическом процессе восстановления деталей военной техники. Проведено сравнение профилограмм круга при обработке на различных режимах. Сделан вывод о том, что при расчете сил резания можно использовать коэффициенты опорной кривой вправленного круга, что будет соответствовать реальному процессу.

Ключевые слова: микрорельеф, восстановление, шлифовальный круг, инструмент, сила резания.

THE GRINDING WHEEL SURFACE CONDITION INFLUENCE ON THE MACHINING PROCESS WHEN RESTORING PARTS

*S.YU. ZHACHKIN, Doctor of Technical sciences, Professor
Voronezh State Technical University (Voronezh)
N.A. PENKOV, Candidate of Technical sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
O.K. BITYUTSKIKH, Candidate of Pedagogical sciences, Associate Professor
Voronezh State Technical University (Voronezh)
A.A. KRASNOV
Voronezh State Technical University (Voronezh)*

The article presents studies of the grinding wheel working surface geometric characteristics influence on the cutting forces that occur during restoration operations of grinding, in order to avoid the appearance of defects in the technological process of restoring military equipment parts. A comparison of the circle's profilograms during processing in different modes is made. It is concluded that when calculating the cutting forces, the coefficients of the reference curve of the set circle can be used, which will correspond to the real process.

Keywords: microrelief, restoration, grinding wheel, tool, cutting force.

Введение. В настоящее время при восстановлении деталей военной техники значительно повышается эффективность финишных упрочняющих технологий как за счёт применения новых высокопрочных материалов для образования покрытий, так и формированием специального



микрорельефа их распределения по рабочей поверхности [1]. В этом направлении представляет интерес использование метода финишного шлифования, одним из достоинств которого является возможность обработки локальных участков изделия, подвергаемых восстановлению. Между геометрией шлифовального круга и усилием его воздействия на восстанавливаемую поверхность установлена корреляционная связь. Превышение некоего предела по усилию воздействия на обрабатываемую поверхность при равенстве численных значений адгезионной и когезионной прочности может привести к возникновению прижогов и шлифовочных трещин [1]. В условиях критических деформаций материала возможно также образование трещин на поверхности и пиков касательных напряжений на кромках трещины.

Актуальность. Анализ эффективности применения шлифовальных кругов в операциях восстановления деталей военной техники показывает, что, несмотря на широкое распространение, они лишь частично используют свои потенциальные возможности. Одной из основных причин такого положения является изменение геометрических характеристик шлифовального круга в процессе его эксплуатации и неупорядоченность формы и ориентации абразивных зерен в теле данных инструментов [2, 3]. Произвольная геометрическая форма, приобретаемая в процессе эксплуатации и расположение зерен в теле кругов, как следствие, формируют произвольную и неблагоприятную геометрию их режущих микроклиньев. В результате часть зерен не участвует либо частично принимает участие в совокупном процессе микрорезания. Искаженная геометрия и неупорядоченная форма и ориентация зерен формируют также дефекты структуры шлифовальных кругов и, как следствие, снижают их прочность, допустимую скорость работы и приводят к значительным колебаниям силы резания. Контроль формы шлифовального круга в процессе эксплуатации открывают перспективу повышения физико-механических и режущих свойств этих инструментов и, поэтому, являются актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование влияния геометрических характеристик рабочей поверхности шлифовального круга на силы резания, возникающие при восстановительных операциях шлифования, с целью избежать появления брака при технологическом процессе восстановления деталей.

Основная часть. Существенное влияние на силы резания при шлифовании оказывают характеристики абразивного инструмента, действие которых проявляется через состояние его рабочей поверхности.

В статье будем исследовать зависимость сил резания от макрогеометрических характеристик рабочей поверхности абразивного инструмента, получаемых в результате правки. При этом оставляем в стороне вопросы, связанные с самим процессом правки круга, поскольку для резания при шлифовании и изучаемых здесь физических явлений в зоне резания проблемы правки существуют лишь постольку, поскольку они позволяют дать ответ на вопрос: какую рабочую поверхность можно получить из предварительно необработанного круга тем или иным способом. Мы же предпринимаем попытку дать общее решение задачи о влиянии макрогеометрии шлифовального круга на силы резания.

При заданных геометрии круга и детали, условиях охлаждения и режимах резания зависимость тангенциальной силы резания P_z в значительной мере определяется коэффициентами μ и ν его опорной кривой.

Характерной особенностью названной зависимости является ее экстремальный характер по параметру ν . Чтобы показать это, продифференцируем выражение, приведенное в [4] и определяющее силу резания при шлифовании по ν и приравняем производную нулю. Тогда получим, что P_z имеет максимум в точках ν_0 , удовлетворяющих равенству:

$$\nu_0 = \frac{1}{\ln \frac{l}{R_z}}. \quad (1)$$



В то же время при фиксированном ν сила резания является монотонной функцией μ , обращается в нуль при $\mu = 0$ и возрастает при $\mu \rightarrow \infty$ до бесконечности.

На рисунке 1 представлена тангенциальная сила резания как функция двух переменных μ и ν , вычисленная для случая плоского шлифования закаленной стали ШХ15 кругом зернистости 25 при диаметре 25 см, ширине 1 см, отношение подачи к ширине шлифования – l , глубина резания 10^{-3} см, скорость вращения детали 10 м/мин, скорость вращения круга = 30 м/с.

Физическое толкование приведенной зависимости выглядит совершенно естественно, если считать, что величина μ пропорциональна количеству контактирующих выступов. Тогда при увеличении числа точек контакта круга и детали при сохранении силы на единичном контакте постоянной, результирующая тангенциальная сила резания должна возрастать таким образом, что при $\mu \rightarrow \infty$ и P_z стремится к бесконечности.

Так как ν определяется формой выступов рабочей поверхности круга [5, 6] и величина ее тем меньше, чем «тупее» режущие выступы, то экстремальный характер зависимости P_z от ν означает, что при определенном угле заострения абразивных зерен $\operatorname{tg}|\gamma| = -\ln\left(\frac{l}{R_z}\right)$ сила резания на контакте будет максимальной.

При увеличении максимальной неровности рабочей поверхности круга, как это следует из [7, 8], величина тангенциальной силы резания возрастает, причем таким образом, что предельные значения P_z при стремлении R_z и μ к бесконечности совпадают.

Определенный интерес представляют зависимости сил резания от переднего угла режущих элементов. В источнике [5] указывается, что тангенциальная сила резания зависит от γ только через функцию $\Psi(1,5; \gamma, \eta)$, так что возрастание Ψ приводит к увеличению силы резания.

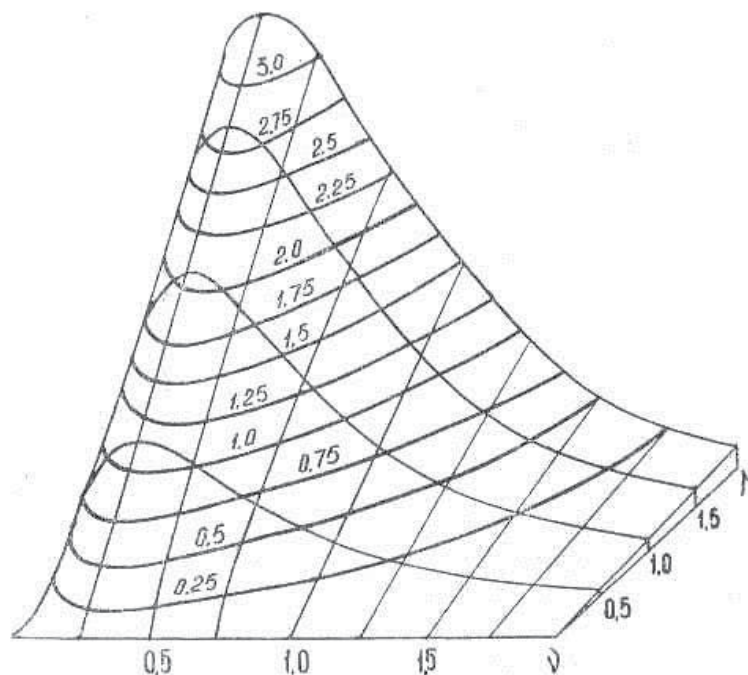


Рисунок 1 – Тангенциальная сила резания как функция коэффициентов опорной кривой

Анализ зависимости Ψ от переднего угла показывает, что при постоянном коэффициенте трения пары «абразивное зерно – обрабатываемый материал» возникают большие силы резания при обработке кругами, у которых более тупые режущие элементы. Поэтому при увеличении переднего угла абразивных зерен сила резания увеличивается тем быстрее, чем больше γ . Так что



для $\gamma > 50^\circ$ незначительное изменение переднего угла приводит к заметному росту тангенциальной силы резания.

Приведенные рассуждения, весьма полезны для качественного анализа влияния различных технических характеристик кругов на силы резания при шлифовании. Значительно больший интерес представляют количественные зависимости сил резания от технических характеристик круга: зернистости, твердости, вида связки и т.д.

Для установления названных зависимостей найдем связь технических характеристик круга с геометрическими параметрами рабочей его поверхности.

Исследование большого количества кругов с различными техническими характеристиками с последующей обработкой результатов этих исследований показывает, что максимальная высота шероховатости круга, в основном, определяется его зернистостью; при этом величина R_z близка к среднему размеру зерен. Поэтому можно утверждать, что $R_z \cong \langle N \rangle$, где $\langle N \rangle$ — средний размер зерен, определяемый по маркировке круга.

Значительно сложнее обстоит дело с определением зависимостей μ и ν от технических характеристик шлифовального круга. Прямые измерения опорных кривых различных кругов, проведенные в [9], показывают, что состояние рабочей поверхности круга не определяется однозначно его техническими характеристиками.

В таблице 1 приведены коэффициенты опорной кривой μ и ν различных кругов, полученные по результатам работы [9] в соответствии с рекомендациями.

Таблица 1 – Коэффициенты μ и ν опорной кривой различных кругов, рассчитанные по приведенным рекомендациям

Материал зерна	Зернистость	Твердость	Связка	μ	ν	
24 А	16	СМ 1	к	0,97	0,82	
	25	СМ 1	к	1,50	0,90	
	40		МЗ	к	1,33	0,86
			СМ 1	к	1,40	0,82
			СМ 2	к	1,45	0,71
			СТ 1	к	1,60	0,66
63 С	12	СМ 1	Б6	1,33	0,71	
	16	СМ 1	К	1,20	0,72	
			Б6	1,37	0,94	
	25		МЗ	К	1,62	0,79
				Б6	0,97	1,03
			СМ 1	Б6	1,10	0,82
			СМ 2	К	1,43	0,68
		С 2	К	1,88	0,66	
	40	СМ 1	К I 1,7,7 I		0,73	
	50	СМ 1	К I 1,99 I		0,75	

На первый взгляд, установить прямую взаимосвязь макрогеометрических параметров опорной поверхности круга с такими «негеометрическими» характеристиками, как твердость и связка, не представляется возможным. Однако при тщательном анализе данных, приведенных в таблице, удастся выявить некоторые общие закономерности. В частности, увеличение твердости круга приводит к возрастанию μ и уменьшению ν . Это значит, что при обработке более твердыми кругами следует ожидать увеличения силы резания.

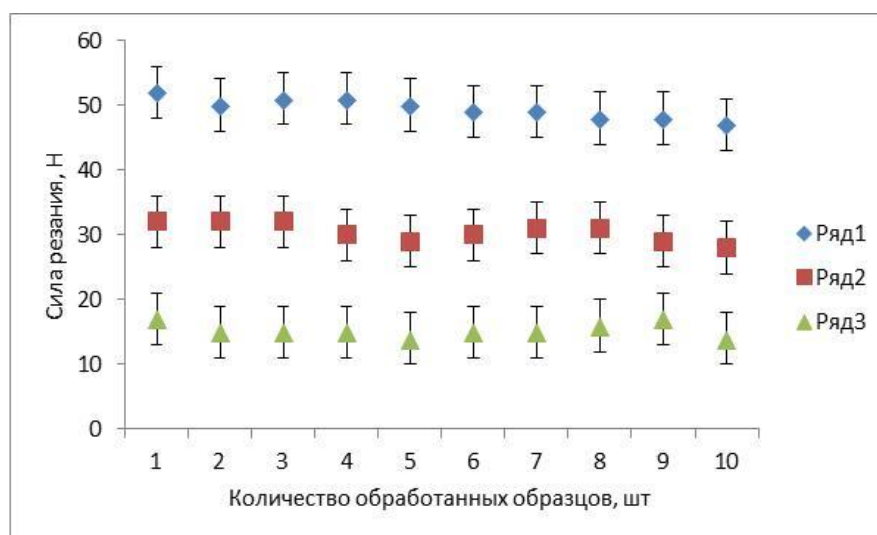


Наличие такой зависимости коэффициентов опорной кривой от твердости кругов объясняется следующим образом. Известно, что под твердостью круга понимается сопротивляемость вырыванию зерна из связки, которая характеризует способность связки удерживать абразивные зерна при различных воздействиях на них. Именно это свойство связки может существенным образом влиять на рельеф рабочей поверхности круга при его правке и работе. Если связка обеспечивает более прочное закрепление зерна, то при правке формирование профиля круга происходит в значительной степени за счет скалывания вершин зерен, а при работе для таких кругов характерно затупление зерен за счет микроскалывания и истирания. Все эти процессы находят непосредственное отражение на профилограммах правленных и изношенных кругов.

Формирование рабочего профиля более мягких кругов происходит, главным образом, за счет вырывания зерен из связки, процессы микроскалывания здесь почти отсутствуют.

Характер зависимостей сил резания от зернистости круга и материала зерна может быть самым разнообразным. Поэтому возможна ситуация, в которой при обработке кругами с совершенно разными техническими характеристиками силы резания будут одинаковы, если только коэффициенты опорных кривых этих кругов совпадают.

Так, измерения сил резания при последовательной обработке нескольких подшипниковых колец однажды правленным кругом, представленные на рисунке 2, при одинаковых условиях показывают весьма незначительные (не более 10 %) колебания сил резания в зависимости от времени шлифования.



Ряд 1 – $v_k = 65$ м/с; $v_d = 200$ м/мин; $s = 2$ мм/мин

Ряд 2 – $v_k = 65$ м/с; $v_d = 200$ м/мин; $s = 6$ мм/мин

Ряд 3 – $v_k = 35$ м/с; $v_d = 100$ м/мин; $s = 6$ мм/мин

Рисунок 2 – Экспериментальные зависимости тангенциальной составляющей силы резания при круглом шлифовании

Приведенные нами данные и выводы относятся к статическим характеристикам шлифовальных кругов.

Выводы. Проведены исследования влияния геометрических характеристик рабочей поверхности шлифовального круга на силы резания, возникающие при восстановительных операциях шлифования.

В частности, сделаны выводы о том, что в процессе обработки микрорельеф режущей поверхности круга может меняться. Величина и направленность этого изменения зависят как от исходной геометрии рабочей поверхности круга, так и от режимов обработки.



Сравнение профилограмм круга при обработке на различных режимах показало существенное различие микрорельефа режущей поверхности. В зависимости от характера износа изменяются и коэффициенты μ и ν , что находит свое отражение в изменении сил резания. Эти изменения происходят за относительно длительные промежутки времени, после обработки нескольких деталей и могут служить критерием определения периода правки круга.

Кроме того, при определенных условиях шлифования, в частности при работе круга в режиме самозатачивания, изменения коэффициентов опорной кривой μ и ν практически не наблюдаются. Таким образом, при расчете сил резания можно использовать коэффициенты опорной кривой вправленного круга, который будет соответствовать реальному процессу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жачкин С.Ю. Холодное гальваноконтактное восстановление деталей. Воронеж: ВГТУ, 2002. 138 с.
2. Табаков В.П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбидов титана. Ульяновск: УлГТУ, 1998. 123 с.
3. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Сидоркин О.А., Нелысов С.В., Беленцов В.Г. Напряжения в композитных материалах, используемых при ремонте деталей машин // Труды ГОСНИТИ, 2016. Т. 124. Ч. 2. С. 52–57.
4. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А. Восстановление гидрораспределителей сельскохозяйственной техники композитным гальваническим покрытием на основе хромовой матрицы // Труды ГОСНИТИ, 2012. Т. 109. Ч. 2. С. 89–93.
5. Бобров В.Ф., Грановский Г.И., Зорев Н.Н. и др. Развитие науки о резании. М.: Машиностроение, 1967. 416 с.
6. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М.: Машиностроение, 1969. 150 с.
7. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Краснова М.Н. Износостойкость композитных гальванических хромовых покрытий // Engineering Studies, 2017. № 3 (2). Т. 9. С. 529–535.
8. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
9. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 247 с.

REFERENCES

1. Zhachkin S.Yu. Holodnoe gal'vanokontaktnoe vosstanovlenie detalej. Voronezh: VGTU, 2002. 138 p.
2. Tabakov V.P. Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytiami na osnove slozhnyh nitridov i karbidov titana. Ul'yanovsk: UIGTU, 1998. 123 p.
3. Zhachkin S.Yu., Pen'kov N.A., Sidorkin O.A., Nelysov S.V., Belencov V.G. Napryazheniya v kompozitnyh materialah, ispol'zuemyh pri remonte detalej mashin // Trudy GOSNITI, 2016. T. 124. Ch. 2. pp. 52–57.
4. Zhachkin S.Yu., Pen'kov N.A. Vosstanovlenie gidroraspredelitelej sel'skohozyajstvennoj tehniky kompozitnym gal'vanicheskim pokrytiem na osnove hromovoj matricy // Trudy GOSNITI, 2012. T. 109. Ch. 2. pp. 89–93.
5. Bobrov V.F., Granovskij G.I., Zorev N.N. i dr. Razvitie nauki o rezanii. M.: Mashinostroenie, 1967. 416 p.
6. Poletika M.F. Kontaktnye nagruzki na rezhuschih poverhnostyah instrumenta. M.: Mashinostroenie, 1969. 150 p.
7. Zhachkin S.Yu., Pen'kov N.A., Krasnova M.N. Iznosostojkost' kompozitnyh gal'vanicheskikh hromovyh pokrytij // Engineering Studies, 2017. № 3 (2). Т. 9. pp. 529–535.



8. Makarov A.D. Optimizaciya processov rezaniya. M.: Mashinostroenie, 1976. 278 p.
9. Maslov E.N. Teoriya shlifovaniya materialov. M.: Mashinostroenie, 1974. 247 p.

© Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Битюцких О.К., Краснов А.А., 2020

Жачкин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, zhach@list.ru.

Пеньков Никита Алексеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательского центра (образовательных и информационных технологий), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, myth_np_nikit@mail.ru.

Битюцких Ольга Константиновна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, olga.bityutskih@yandex.ru.

Краснов Андрей Андреевич, магистрант кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, fillin19956@mail.ru.